

УЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ В ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТАХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДРЕН И НЕСОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН

В.Ф. Жабин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент
ФГОУ ВПО «Московский государственный университет
природообустройства», г. Москва, Россия

Н.П. Карпенко, доктор технических наук, доцент
ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт
гидротехники и мелиорации
им. А.Н.Костякова Россельхозакадемии, г. Москва, Россия

Предложена методика	The technique of the account
учета вертикальной	of vertical anisotropy in
анизотропии в	filtrational calculations of
фильтрационных расчетах	horizontal absorbing wells and
горизонтальных дрен и	interpretation of experimental
интерпретации опытных	evacuations from incomplete
откачек из несовершенных	driven wells is offered. It is
скважин. Отмечено, что	noted, that anisotropy gains
особое значение	special value at assessments of
анизотропия приобретает	works of incomplete absorbing
при оценках работы	wells and driven wells when
несовершенных дрен и	power of a reacting region of
скважин, когда оценивается	their act is sized up.
мощность активной зоны	
их действия.	

Введение. Урбанизация, хозяйственное использование территорий и отсутствие гидрогеологического мониторинга остро ставят проблему соблюдения требований охраны окружающей среды и разработки защитных мероприятий по предотвращению негативных процессов освоения земель на стадии проектирования. В этих условиях прогноз, связанный с оценкой режима грунтовых вод в перспективе, параметров дренажа и его эффективности становится одним из главных элементов проектирования, основанного на результатах гидрогеологических исследований. Особое внимание здесь должно уделяться изучению неоднородности отложений, выраженной в изменении основного их свойства, в данном случае, водопроницаемости.

Отложения взвесенесущих потоков, объединенных в группу флювиальных (аллювиальные, морские, пролювиальные, озерные и водно-ледниковые), а также их сочетания занимают ведущее место в качестве элементов природной среды инженерных сооружений и систем. Установлено, что в обычных условиях формирования флювиальных отложений образуются слои с выраженной вертикальной микронеоднородностью, обусловленной размером частиц, их формой, упаковкой и ориентировкой [5]. Эта особенность петрогенеза находит отражение в различии водопроницаемости слоя горных пород в зависимости от направления фильтрации-анизотропии. Важность наблюдаемой при бурении скважин неоднородности (макро) неоднократно подчеркивается многими исследователями, однако в задачах подпора грунтовых вод и дренирования, серьезного

внимания требует и внутрислойная неоднородность, редко определяемая визуально (открытые горные выработки и естественные обнажения).

Рассмотренное свойство упомянутых отложений, является носителем фильтрационной анизотропии, методы оценки и учета которой в расчетах разработаны недостаточно полно. Ранее нами освещались вопросы учета анизотропии в гидрогеологических расчетах [2, 4, 5]. Недооценка её влияния, точнее, неправомерное допущение изотропности природных сред при математическом описании процессов инфильтрационного подпора и дренирования, приводит к занижению функции напора в характерных сечениях фильтрационных потоков или к ошибочным расчетам дренажа, поэтому при решении задач гидрогеологического прогнозирования эти характеристики являются определяющими.

Методы исследований. Переход от слоисто-неоднородной среды к анизотропной осуществляется при допущении $L > 8 m_i \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}$ (Пашковский И.С.). Если учесть, что мощность элементарного слоя (m_i) измеряется долями метра, то легко убедиться в почти априорном соблюдении данного условия.

Рассмотрим некоторые стороны методов расчета горизонтального дренажа в анизотропной среде, схема которой представлена на рис. 1.

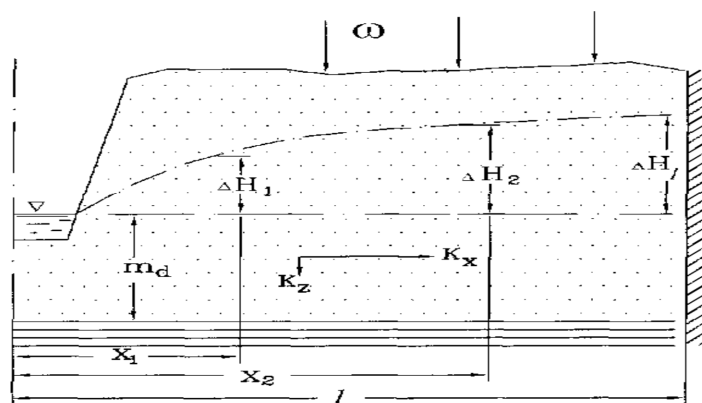


Рис – 1 Симметричный поток к несовершенной дрене

В общем случае движения симметричного двухстороннего инфильтрационного потока, длиной (l), для любой точки профиля от водораздела до дренажа, справедливо считать [2]:

$$\Delta H_{x,l} = \frac{A \omega l x}{T_x} \quad (1)$$

$$A = \left[1 - 0.5 \bar{x} - \varphi(\beta) \sin 0.5 \pi \bar{x} + \frac{2 L_{nd}}{x} \right]$$

$$\beta = \frac{at}{l^2}; \bar{x} = \frac{x}{l}; \quad \text{При } \beta \geq 3 \quad A = A_1 = \left(1 - 0.5 \bar{x} + \frac{2 L_{nd}}{x} \right),$$

$$T_x = 0.5 k_x (m_l + m_d), \quad m_l = m_d + \Delta H_l$$

Посередине между дренажами при $\bar{x}=1$ имеем:

$$\Delta H_l = \frac{\omega l^2}{2T} \left[1 - 2 \varphi(\beta) + \frac{4 L_{nd}}{l} \right] \quad (2)$$

$$\text{При } \beta \geq 3 \quad \Delta H_l = \frac{\omega l^2}{2T} \left(1 + \frac{4 L_{nd}}{l} \right), \quad (3)$$

где: m_d - мощность водоносного горизонта под дренажем.

$$q_l = \omega l \phi(\beta) \quad (4)$$

Значения функций $\varphi(\beta)$ и $\phi(\beta)$ приведены в работе [2]. Исследование характера изменения приведенных специальных функций показывает линейный подъем уровня

грунтовых вод в начальный период инфильтрации, поэтому влияние дрены не сказывается. Затем скорость повышения поверхности грунтовых вод снижается по мере усиления дренирования. При $\beta = 1$ величина инфильтрационного подпора достигает 0,9 от максимума. Дренажный расход также увеличивается во времени. Эффективность естественных дрен, время ввода искусственного дренажа и его расход ориентировочно можно оценить, используя приведенные зависимости и допустимую величину подъема уровня грунтовых вод.

Отдельно следует остановиться здесь на параметре $L_{nd}(\Delta L)$, характеризующем дополнительное фильтрационное сопротивление на границе потока грунтовых вод. Этот параметр отражает несовершенство дрены (скважины) по отношению к дренируемому водоносному пласту. Принято выделять два вида несовершенства:

- по степени вскрытия пласта, соответствующей положению дрены (скважины) относительно его вертикальных границ и фильтрационной неоднородности или анизотропии;
- по характеру вскрытия, зависящего от заиливания стенок горной выработки, применяемых материалов и технологии строительства. Несовершенство второго вида иногда называют «скин-эффектом».

Величину сопротивления принято выражать в метрах эквивалентной дополнительной длины потока, полученной расчетным путем или графическим построением (виртуальным смещением реальной границы). Аналитические способы определения сопротивления горизонтальных дрен приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные формулы для определения сопротивления горизонтальных дрен

Расчетная схема	Строение пласта	Расчетная формула $L_{nd}(\Delta L)$
Водоем или водоток шириной $2b_r$ с изм.	Однородно-анизотропный Двухслойный	$\Delta L_1 \approx 0.44m_d \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} + 0.08 \frac{m^2 \frac{k_x}{k_z}}{b_r} \approx 0.5m_d \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}$ (5) $\Delta L_2 \approx \sqrt{\frac{T_2 m_1}{k_1}}$ $(5a)$ $T_2 = k_2 m_2$
Горизонтальная дрена *	Однородно-анизотропный	$L_{nd1} = 0.73 m_d \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \lg \frac{2 m_d \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}}{\pi d}$ (6)
Водоток, водоем, ограниченной ширины	Двухслойный	$\Delta L_* = \Delta L_2 \operatorname{cth} \left(\frac{2b_r}{\Delta L_2} \right)$ (7)
Систематический горизонтальный дренаж *	Двухслойный, анизотропный	$L_{nd} \approx 0.73 \frac{T_2}{\sqrt{k_x k_z}} \lg \frac{8 m_{d1} \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}}{\pi d}$ (8)

Систематический горизонтальный дренаж *	Трехслойный	$L_{nd} = \frac{T_3}{2T_1} \sqrt{\frac{m_2 T_1 T_3}{k_2 (T_1 + T_3)}} + \frac{T_1 + T_3}{T_1} L_{nd1}$ (9)
Комбинированный дренаж *	Трехслойный, двухслойный	$L_{kd} = \frac{L_{nd} L_{kc}}{L_{nd} + L_{kc}}, L_{kc} = 0.366 \sigma \lg \frac{\sigma}{\pi d_c}$ (10)
Береговая дрена (по С.Ф. Аверьянову, с изменениями)	Однородно-анизотропный	$L_{bd} = \frac{1}{1 + \frac{L_{nd}}{x_d + \Delta L}}, L_{nd} = 1.47 m_d \lg \frac{1}{\sin \frac{\pi d}{2 m_d}}$ (11)

В формуле (11) возможна замена L_{nd} на ΔL , перед m_d добавляется множитель, учитывающий фильтрационную анизотропию, по аналогии с зависимостью (6), а значение синуса можно заменить значением его аргумента. Данные таблицы 1 показывают, что практически все дренирующие границы потоков грунтовых вод имеют дополнительное фильтрационное сопротивление, которое необходимо учитывать заменой действительной координаты (x) на расчетную координату $X = x + (\Delta L)$.

Заметим, что в формулы (5) и (7) входит половина ширины естественной дрены, которая может быть определена, как $b_r \approx 1.35 m_d \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}$ и $b_r \geq 3 \Delta L_2$, соответственно, для однородно-анизотропного и двухслойного строения ложа водоема или водотока.

Единичный установившийся расход (удельная величина естественных ресурсов в условиях естественной дренированности) оценивается, как:

$$q_0 = \omega l. \quad (12)$$

Однако, расход воды, поступающий в дрена, распределяется в зависимости от ее несовершенства и условий формирования потока грунтовых вод. Так единичный расход инфильтрационного потока грунтовых вод в реке, следуя рекомендациям С.Ф. Аверьянова, определим, как:

$$q_r = q_0 \frac{2\zeta}{1 + \zeta}, \quad \zeta = L_{bd}, \quad (13)$$

что при $L_{nd} = \Delta L$, ($x_d = 0$) дает $\zeta = 0.5$ и $q_r \approx 0,67 q_0$.

При этом на урезе разгружается $q_{r0} = 0,33 q_0$. Иными словами, независимо от величины сопротивления, на урезе водотока (водоема) разгружается около 1/3 расхода потока грунтовых вод, идущего с водораздела. Близкий по значению результат получается, если использовать решение В.М Шестакова с заменой x на X . В этом случае, расход грунтовых вод в каждом сечении под рекой будет равен:

$$q_x = T \frac{\Delta H_0}{\Delta L} e^{-\frac{x + \Delta L}{\Delta L}} = q_0 e^{-\frac{x + \Delta L}{\Delta L}}, \quad (14)$$

а на урезе $x = 0$ и $q_{r0} = q_0 e^{-1} \approx 0,368 q_0$.

Тот же результат получается при решении дифференциального уравнения вида:

$$-\frac{dq}{dX} = \frac{q}{\Delta L}, -\ln q = \frac{X}{\Delta L} + C, X = 0; q = q_0, \quad (15)$$

Тогда

$$-\ln \frac{q_x}{q_0} = \frac{X}{\Delta L}, q_x = q_0 e^{-\frac{x+\Delta L}{\Delta L}}, q_{ro} \approx 0.368 q_0 \quad (16)$$

Определим ширину зоны разгрузки, считая от уреза. При $x = 2\Delta L$, $q_r = 0,05q_0$, то есть на этом расстоянии от уреза поток грунтовых вод разгрузится только на 95%. При меньшей ширине реки, «проскок» потока грунтовых вод под рекой будет больше, поэтому это необходимо учитывать при размещении головных дрен. Аналогичные оценки выполним на основе решения (3) для систематического дренажа. В этом случае, в дренах поступит половина единичного притока:

$$q_d = \omega l = \frac{2T \cdot \Delta H}{l \left(1 + \frac{2L_{nd}}{l} \right)} = \frac{2Ti}{1 + \frac{2L_{nd}}{l}} \quad (17)$$

где: $T = k_x (m_d + 0,5\Delta H)$, i -уклон потока грунтовых вод.

Если дрена является совершенной, то (m_d и $L_{nd} \rightarrow 0$), формула (17) обращается в аналог формулы Кене:

$$l = \Delta H \sqrt{\frac{k_x}{\omega}} \quad (18)$$

При расчете междренних расстояний в анизотропных средах необходимо определять мощность «активной зоны», в которой проходит основной фильтрационный поток под дренами.

При $L/m \geq 2,55$ имеем [1]:

$$m_a = \alpha m_d = \frac{m_d L}{L + 2L_{nd}}, \quad \alpha = \frac{1}{1 + \frac{L_{nd}}{L}}, \quad L = 2l. \quad (19)$$

Прямое определение H_a по формуле (19) весьма затруднительно, так как искомая функция содержится в аргументах. Расчет можно упростить, если подбором найти редукционные коэффициенты (α_1, α_2) <1, используя тождества:
Для однородной среды

$$A_1 = \left(\frac{\alpha_1}{1 - \alpha_1} \right)^2 (1 - 0,75\alpha_1) \cdot \lg^2(\alpha_1 c) \quad ; \quad c = \frac{2m_d \sqrt{\frac{k_x}{k_z}}}{\pi d} \quad (20)$$

$$A_1 = \frac{0,933\Delta H(1 + 0,5\Delta H / m_d)k_z}{\omega m_d},$$

$$H_{1a} = \alpha_1(m_d + 0,5\Delta H),$$

$$\text{для двухслойной} \quad A_2 = \left(\frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \right)^2 (1 - 0,75\alpha_2) \quad ; \quad (20a)$$

$$A_2 = \frac{0,933\Delta H' k_x k_z}{m_2 \omega k_h} \cdot \frac{1}{\lg^2 \left(\frac{8m_{d1}}{\pi d} \cdot \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \right)}, \quad H_{2a} = \alpha_2 m_2, \quad T_2 = k_h H_{2a},$$

$$\Delta H' = \Delta H_1 - \frac{\omega(m_d + \Delta H_1)}{k_z}.$$

Для нестационарного потока в пространстве между дренами существенную роль при аналогичных оценках играет фактор времени. Кроме того, надо корректировать величину инфильтрационного питания, если норма осушения меньше «критической» глубины испарения грунтовых вод [5].

В таблице 2 приведены для сравнения результаты расчета междренних расстояний (L) в зависимости от типа среды и фильтрационной схемы.

Таблица 2 – Результаты расчета междренних расстояний в зависимости от типа природной среды

Однослойная изотропная среда	m_d , м	ΔH , м	πd , м	κ , L	κ , L	κ , L	ω , м/сут
	10	1,5	1,57	0,03 54	0,3 224	3 771	$4 \cdot 10^{-4}$
Однослойная анизотропная среда	m_{da}	ΔH	πd	κ_z	κ_x	L	ω
	7,3 $\alpha =$ 0,73	1,5	1,57	0,03	3	542	$4 \cdot 10^{-4}$
Двухслойная Изотропная среда	m_{d2}, m_{d1}	ΔH	πd	κ_1	κ_2	L	ω
	8 4	1,43	1,57	0,03	12	111	$4 \cdot 10^{-4}$
Двухслойная анизотропная среда	m_{a2}, m_{d1}	$\Delta H'$	πd	$\kappa_{1z},$ κ_{1x}	κ_{2h}	L	ω
	3,9 4 $\alpha =$ 0,49	1,43	1,57	0,3 3	12	510	$4 \cdot 10^{-4}$

Расчет междренних расстояний выполнен по формулам С.Ф. Аверьянова и В.М. Шестакова, преобразованным нами [5] для анизотропных сред. В таблице 2 показано влияние анизотропии на величину расстояния между дренами и мощность активной зоны, несмотря на формальное равенство отдельных значений коэффициентов фильтрации (м/сутки). Отметим, что для однородно-изотропной среды $K = 0,3$ м/сут соответствует среднегеометрическому из двух остальных величин (3,0 и 0,03). Дополнительный анализ показал, что междреннее расстояние практически не зависит от общей мощности анизотропного слоя, если она больше активной зоны.

Приведенные результаты показывают необходимость выбора гидрогеологических характеристик для расчета параметров дренажа на основе литолого-генетических и фильтрационных критериев. Это, в свою очередь, требует целенаправленного (не формального) подхода при постановке, проведении и интерпретации опытно-фильтрационных работ (ОФР) или режимных наблюдений (ОФН). Методы фильтрационного опробования анизотропных природных водонасыщенных сред и зоны аэрации при изысканиях доступно изложены в существующих литературных источниках, включая научные разработки и пособия [3, 5, 6].

Подчеркнем важность определения горизонтальной водопроницаемости покровного слоя двухслойного пласта по данным экспресс-откачек из скважин, не оборудованных фильтрами. Вместе с тем, можно использовать данные наблюдений за снижением динамического уровня в скважинах покровного слоя при откачке из нижнего, хорошо проницаемого слоя. При постоянном дебите откачки, водопроницаемость покровного слоя (T_x) приближенно определяется в период квазистационарного режима по формуле Дюпюи для двух наблюдательных скважин, расположенных в покровном слое.

В практике проектно-изыскательских работ используется только вертикальная составляющая водопроницаемости этого слоя, что приводит к неоправданному занижению параметров дренажа и искусственному завышению его стоимости. Очевидной является роль идентификации расчетной схемы дренажа и геологических условий, которая способствует достижению оптимальной стоимости и функциональной эффективности

проектируемых мероприятий. Учет «активной зоны» при проектировании работы несовершенных скважин вертикального дренажа рекомендуется проводить с учетом рекомендаций [2].

В анизотропном водоносном слое, согласно исследованиям Ю.О.Зеегофера, имеем:

$$S = \frac{Q}{2\pi k_r l} \ln \frac{l \sqrt{\frac{k_r}{k_x}}}{r} \quad \text{при } r \leq 0,25l \quad (21)$$

Имея данные двух наблюдательных скважин, можно найти фильтрационные характеристики, а по результатам 2-3 ступеней откачки уточнить зависимость величины активной зоны от понижения. Наиболее полное определение гидрогеологических параметров в разнообразных условиях представлено В.А. Мироненко и В.М.Шестаковым [6]. Ориентировочную оценку фильтрационных характеристик по результатам кустовой откачки можно выполнить при стабилизации режима опыта, который наступает довольно быстро, особенно, в анизотропной среде, когда расстояния до наблюдательных скважин составляют:

$$r \leq H_a \sqrt{\frac{k_r}{k_z}}, \quad S = \frac{Q}{2\pi T_a} \ln \frac{1,12B^*}{r} \quad (22)$$

где: $B^* = \sqrt{\frac{T_a H_a}{\delta k_z}}$ - фактор стабилизации, T_a - обобщенная водопроницаемость

активной зоны.

В однородно-анизотропном слое $\delta = 3$, трещинно-пористой анизотропной среде этот параметр уменьшается до 1,5. Зависимости $Q \rightarrow S$ могут иметь различную форму, которая в общем случае, определяется вкладами нелинейности фильтрации, гидравлическими потерями в водоподъемных трубах, скинэффектом и ростом активной водопроницаемости [6]. Коэффициент вертикальной водопроницаемости находится по формуле (22), а расчетная мощность по вертикали вычисляется путем раскрытия фактора стабилизации.

Заключение. Предложенная методика учета вертикальной анизотропии в фильтрационных расчетах горизонтальных дрен и интерпретации опытных откачек наиболее полно идентифицирует природную среду при решении гидрогеологических задач, связанных с осушением территорий и оценкой эксплуатационных запасов подземных вод. При выполнении проектов дренажа необходим регламент планирования изысканий с целью обоснования расчетных схем по литогенетическим и фильтрационным признакам, а также изменение технологии расчетов параметров систематического горизонтального дренажа и оценки работы несовершенных скважин.

Библиографический список

1. Аверьянов С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. - М.: Колос, 1978, 288 с.
2. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. - М.: Стройиздат, 1948, 226 с.
3. Богомолов Ю.Г., Жабин В.Ф., Хачатурян В.Х. Изменение гидрогеологических условий под влиянием мелиорации. - М.: Наука, 1979, 162 с.
4. Лютин Дж. Дренаж сельскохозяйственных земель. Пер. с англ. под ред. С.Ф.Аверьянова. - М.: Колос, 1964, 720 с.
5. Манукьян Д.А., Жабин В.Ф. Гидрогеоэкологические проблемы в задачах природообустройства. - М.: МГУП, 2006, 194 с.
6. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - М.: Недра, 1978, 325 с.